

УДК 524.3-735+535.3+537.6

А. И. СЕРЫЙ

О ФАРАДЕЕВСКОМ И КОМПТОНОВСКОМ ВРАЩЕНИИ

Одна из областей применения эффекта Фарадея – астрофизические исследования при различных магнитных полях, в т.ч. недостижимых в земных условиях. Тем более, что поляризация излучения и интенсивные магнитные поля взаимосвязаны [1; 2, с. 185]. Важен вопрос об аналогичном применении комптоновского вращения плоскости поляризации (не в оптической, а в рентгеновской области) [3, с. 91].

Таблица 1 – Влияние магнитного поля на вращение плоскости поляризации

Диапазон	$B = 0$	$B \neq 0$
оптический	естественная оптическая активность [4, с. 426]	эффект Фарадея [5, с. 276]
рентгеновский	комптоновское вращение во 2-м порядке теории возмущений	комптоновское вращение в 1-м порядке теории возмущений

Так как фарадеевский угол поворота $d\varphi/dx$ зависит от частоты ω (преимущественно оптический диапазон), индукции магнитного поля B , концентрации электронов n_e (в т.ч. в межзвездной и межгалактической среде), температуры T , то, измеряя положение плоскости (эллипса) поляризации на разных ω и оценивая B (по зеемановскому расщеплению [6, с. 77], гироспиниям или степени поляризации излучения [7, с. 453], исходящего от объекта) и T (пирометрическими методами по разным характеристикам спектра [4, с. 589]), можно оценить n_e [8, с. 191–194]. Чем больше неопределенность в оценке B и T , тем менее точно определится n_e .

При малых B (когда соответствующие методы измерения непригодны) остается 1 параметр (T). Тогда n_e можно определить точнее по комптоновскому вращению при разных ω (не рассматривая вопрос о естественной оптической активности в космосе). При этом берем слагаемое 2-го порядка теории возмущений, которое при малых B заметно превосходит 1-й порядок и не зависит от B . Методы рентгеновской астрономии позволяют делать подобные измерения [7, с. 340].

При этом важно учитывать, что: 1. При больших пространственных размерах излучающей области разные участки могут не коррелировать между собой по фазе, что может привести к деполяризации; наличие же корреляции должно свидетельствовать об упорядоченном магнитном поле

[8, с. 191–194]. 2. При фарадеевском вращении электроны связанные, а при комптоновском – свободные. Несмотря на то, что в рентгеновском диапазоне почти все электроны могут считаться свободными, различие в оценках n_e может позволить оценить степень ионизации.

Ионизация может происходить и во внешних магнитных полях, разрушающих кристаллическую решетку [7, с. 449] $B > B_{am} = m_e^2 e^3 c / \hbar^3 = 2,35 \cdot 10^9$ Гс. При таких B не наблюдаются даже квадратичный эффект Зеемана и эффект Пашена – Бака: спектры химических элементов искажаются до неузнаваемости, преобладает сплошной фон (с линейной или круговой поляризацией), что подтверждает преобладание свободных электронов (например, у некоторых белых карликов [1; 2, с. 185]). Это должно привести к резкому уменьшению роли фарадеевского вращения, несмотря на то, что в [9, с. 4] утверждается о возможности наблюдения эффекта Фарадея при $B \sim 10^{11} - 10^{12}$ Гс. Скорее всего, имеется в виду разность показателей преломления (магнитное двупреломление вакуума при энергиях, когда невозможно рождение e^+e^- -пар [6, с. 703]) при $B \leq B_{uv} = \sqrt{mc^2(mc/\hbar)^3 / \alpha} \approx 4.4 \cdot 10^{13}$ Гс [7, с. 449]; здесь, однако, помимо вращения уже существенно расщепление фотонов [10, с. 637–643].

По предложению В.Г. Барышевского и В.В. Тихомирова в [11, с. 48] в 1-м приближении получена формула для угла комптоновского вращения плоскости линейной поляризации фотонов (волновой вектор \vec{k}) в электронном газе, полностью поляризованном по спину в магнитном поле \vec{B} . Для оценочных расчетов положим в ней импульс электрона (массой m_e) вдоль магнитного поля $p_z = 0$ и угол между \vec{k} и \vec{B} $\beta = 0$, а также используем приближенную формулу для ширины резонанса Γ_n виртуального электрона на n -м уровне Ландау (α – постоянная тонкой структуры, μ_B – магнетон Бора, e – элементарный заряд):

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{(\pi\hbar c)^2 \alpha n_e m_e c^2}{m_e c^2 + \hbar\omega} \left(\frac{\chi}{\chi^2 + \Gamma_1^2 (m_e^2 c^4 + 2Be\hbar c + \hbar^2 \omega^2)} - \frac{1}{2\hbar\omega m_e c^2 + 2Be\hbar c} \right),$$

$$\chi = 2\hbar\omega m_e c^2 - 2Be\hbar c + \Gamma_1^2 / 4, \quad 3m_e c^2 \Gamma_n \approx 16(2n-1)\alpha(\mu_B B)^2. \quad (1)$$

При $B \rightarrow 0$ $d\varphi/dx \rightarrow 0$ (причем смысл β теряется, поэтому полагать $\beta = 0$ правомерно). Как и в эффекте Фарадея, имеется резонанс [12]. При переходе через него знак $d\varphi/dx$ меняется, как и при ядерной прецессии нейтронов [3, с. 54]. Сравнивая (1) с формулами для вращений во 2-м приближении [3, с. 93, 94], а также для фарадеевского [3, с. 89], убеждаемся, что везде $d\varphi/dx \sim n_e$, т.е. различие будет лишь из-за B , ω .

Рассмотрим поля $\sim 10^{10}$ Гс ($B_{am} < B \ll B_{usc}$). Комптоновское вращение формально сравнимо фарадеевским (в 1-м приближении) при $\hbar\omega \sim 0.1\text{--}0.5$ МэВ ($\sim 10^{-2}\text{--}10^{-3}$ рад/см), хотя соответствующие формулы для фарадеевского могут быть неприменимы. При полной поляризации комптоновское вращение в 1-м порядке больше, чем во 2-м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leverhulme lectures on stellar magnetism. 1. Overview [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.arm.ac.uk/lectures/landstreet/slides/Lecture-1-intro-to-stellar-magnetism.pdf>; Atomic physics needed to measure fields in stars [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.arm.ac.uk/lectures/landstreet/slides/Lecture-2-atoms-in-magnetic-fields.pdf>
2. Физическая энциклопедия : в 5 т. / А.М. Прохоров (гл. ред.), ред. кол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М. : Сов. энцикл., 1988–1998. – Т. 1 : Ааронова–Бома эффект – Длинные линии. – 1988. – 704 с.
3. Барышевский, В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред / В.Г. Барышевский. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
4. Физическая энциклопедия : в 5 т. / А.М. Прохоров (гл. ред.), ред. кол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М. : Большая Рос. энцикл., 1988–1998. – Т. 3 : Магнитоплазменный – Пойнтинга теорема. – 1992. – 672 с.
5. Физическая энциклопедия : в 5 т. / А.М. Прохоров (гл. ред.), ред. кол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М. : Большая Рос. энцикл., 1988–1998. – Т. 5 : Стробоскопические приборы – Яркость. – 1998. – 691 с.
6. Физическая энциклопедия : в 5 т. / А.М. Прохоров (гл. ред.), ред. кол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М. : Сов. энцикл., 1988–1998. – Т. 2 : Добротность – Магнитооптика. – 1990. – 703 с.
7. Физическая энциклопедия : в 5 т. / А.М. Прохоров (гл. ред.), ред. кол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М. : Большая Рос. энцикл., 1988–1998. – Т. 4 : Пойнтинга – Робертсона – Стримеры. – 1994. – 704 с.
8. Железняков, В.В. Электромагнитные волны в космической плазме / В.В. Железняков. – М. : Наука, 1977. – 432 с.
9. Зельдович, Я.Б. Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике / Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.Л. Франкевич // УФН. – 1988. – Т.155. – Вып. 1. – С. 3–45.
10. Берестецкий, В.Б. Квантовая электродинамика / В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. – М. : Наука, 1980. – 704 с.
11. Серый, А.И. О комптоновском вращении при движении фотонов под произвольным углом к линиям индукции магнитного поля. / А.И. Серый // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 4. Матэматыка. Фізіка. – 2011. – № 2. – С. 43–48.
12. Продольный магнитооптический эффект Фарадея [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ofar.ulstu.ru/res/puevm/PAGE13.HTM>.